



HAL
open science

Interopérabilité des systèmes PLM : un état de l'art sur la chaîne numérique conception/industrialisation

Christophe Danjou, Julien Le Duigou, Benoît Eynard

► To cite this version:

Christophe Danjou, Julien Le Duigou, Benoît Eynard. Interopérabilité des systèmes PLM : un état de l'art sur la chaîne numérique conception/industrialisation. JD/JN MACS 2013, Jul 2013, Strasbourg, France. hal-01058826

HAL Id: hal-01058826

<https://hal.science/hal-01058826>

Submitted on 28 Aug 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Interopérabilité des systèmes PLM : un état de l'art sur la chaîne numérique conception/industrialisation

Christophe Danjou¹, Julien Le Duigou¹, Benoit Eynard¹

¹Département Génie des Systèmes Mécaniques,
Université de Technologie de Compiègne, Laboratoire de mécanique Roberval UMR CNRS 7337
Rue du Docteur Schweitzer, BP 60319
60203 Compiègne cedex, France.

christophe.danjou@utc.fr

julien.le-duigou@utc.fr

benoit.eynard@utc.fr

Résumé— De nos jours, l'interopérabilité des systèmes est primordiale pour assurer une stratégie de gestion du cycle de vie du produit (PLM). Cependant il existe encore certaines barrières à l'interopérabilité à la fois techniques et scientifiques qui inhibent l'échange entre les différents systèmes d'informations. Dans un premier temps cet article définit l'interopérabilité de manière générique et identifie les verrous à lever. Il présente ensuite un état des lieux des solutions développées pour réaliser l'interopérabilité entre les phases de conception, de fabrication et d'assemblage. Enfin des perspectives quant à l'interopérabilité de la chaîne numérique conception/industrialisation sont proposées.

Mots-clés— Interopérabilité, Conception/industrialisation, PLM.

I. INTRODUCTION

Face à la mondialisation et la concurrence croissante en termes de coût de produit, les entreprises doivent sans cesse augmenter leur productivité. Dans un contexte de « Rapid-Development », les entreprises sont contraintes d'améliorer leur capacité à industrialiser leurs produits et leurs processus avec toujours plus de rapidité, à moindre coûts et en conservant un très bon niveau de qualité. Pour faire face à ces problématiques, il est nécessaire de réutiliser les connaissances métiers capitalisées lors de précédents projets notamment au cours de la phase d'industrialisation très consommatrice de moyens et de temps : cette phase s'étend du bureau d'étude à l'usinage. Cependant, il est difficile de capitaliser le savoir-faire de coupes sans mettre en œuvre des procédures et outils coûteux permettant la capitalisation. Par conséquent, dans beaucoup d'entreprises, les connaissances métiers demeurent aux pieds des machines-outils avec les opérateurs.

Le projet FUI ANGEL (Atelier Numérique coGnitif intEropérable et agiLe) va se focaliser sur la capitalisation des savoir-faire de coupes pour l'amélioration de la compétitivité des entreprises en développant des outils et méthodes qui permettront de récupérer les informations issues des usinages des machines-outils à commandes numériques. Pour atteindre cet objectif de bidirectionnalité de la chaîne d'information, il apparaît nécessaire que les systèmes soient en mesure d'échanger des informations et d'utiliser ces informations.

L'interopérabilité définie ainsi, comme l'échange d'informations entre les différents systèmes et l'utilisation des fonctionnalités, permet de traiter les problèmes de continuité de la chaîne numérique et ainsi d'assurer la capitalisation des savoir-faire métiers en assurant un lien entre les différentes étapes qui s'étendent de la phase de conception à la production.

Dans la section suivante, nous présentons un état de l'art sur l'interopérabilité ainsi que les solutions existantes pour favoriser cette interopérabilité. Dans la troisième section nous analyserons les différents travaux réalisés pour l'échange et le transfert des informations entre les phases de conception et d'industrialisation. Enfin la quatrième partie conclut cet article et donne quelques perspectives quant à l'interopérabilité de la chaîne numérique conception/industrialisation.

II. ÉTAT DE L'ART

A. Définition de l'interopérabilité

Selon Kosanke [1], une recherche sur internet donne 22 définitions de l'interopérabilité. En fonction de l'interprétation qui en est faite et des attentes des personnes qui l'emploient, le terme interopérabilité peut prendre différents sens. C'est pourquoi, on retrouve dans la littérature un grand nombre de définition de l'interopérabilité. IEEE [2] définit l'interopérabilité comme « La capacité pour deux (ou plus) systèmes ou composants à échanger des informations et à utiliser les informations échangées ». Des projets tels que ATHENA [3] ou INTEROP NoE [4] définissent l'interopérabilité pour les entreprises comme étant la capacité d'interaction entre entreprises ou tout du moins entre parties d'entreprises. On peut enrichir la définition ci-dessus avec la vision de Vernadat [5] qui définit l'interopérabilité comme « la capacité à communiquer avec des systèmes pairs et à accéder aux fonctions des systèmes pairs ». Pour traiter le sujet qui nous intéresse ici, nous retiendrons la définition de Wegner [6] qui décrit l'interopérabilité comme « La capacité pour deux systèmes (ou plus) à communiquer, coopérer et échanger des données et services, et ce, malgré les différences

dans les langages, les implémentations et les environnements d'exécution ou les modèles d'abstraction ». On pourrait donc résumer l'interopérabilité sous forme d'un triptyque :

- Communiquer et échanger les informations
- Utiliser les informations échangées
- Utiliser les fonctionnalités d'un système tiers

B. Le continuum intégration

D'après Chen et Vernadat [7], l'interopérabilité est une étape pour parvenir à réaliser une intégration complète. L'interopérabilité est souvent vue comme une forme de coexistence, d'autonomie et d'environnement fédérateur, contrairement à l'intégration qui fait référence à un concept de coordination, de cohérence et d'uniformisation. L'intégration totale résulte de systèmes interdépendants et qui ne sont pas séparables. A l'inverse on retrouve les systèmes interopérables basés sur la communication et qui interagissent. Ces derniers peuvent ainsi échanger des services tout en conservant leurs propres logiques de fonctionnement. On peut donc avoir l'affirmation suivante : « Deux systèmes intégrés sont forcément interopérables, alors que deux systèmes interopérables ne sont pas forcément intégrés ». [8]

A l'opposé de l'intégration, on retrouve la compatibilité. La compatibilité signifie que les systèmes n'interfèrent pas dans le fonctionnement les uns avec les autres. Des systèmes interopérables sont donc compatibles mais l'inverse n'est pas vrai, des systèmes compatibles ne sont pas forcément interopérables lié au fait qu'ils n'échangent pas de services.

En résumé, l'interopérabilité se place dans le « continuum intégration » entre la compatibilité et l'intégration totale. Si la compatibilité apparaît comme le minimum requis, la frontière entre interopérabilité et intégration dépend directement du niveau d'opérations de ce genre de systèmes. La figure 1 décrit le « continuum intégration ».



Fig. 1 : Continuum Intégration

C. Niveaux d'interopérabilité

D'après EIF [9] il existe trois niveaux d'interopérabilité :

- Le niveau sémantique
- Le niveau technique
- Le niveau organisationnel

Un système est dit interopérable si et seulement s'il répond à chaque instant aux trois niveaux d'interopérabilité. Le niveau technique assure la continuité du flux d'informations au travers d'outils et de solution technologiques. Le niveau sémantique assure le partage de l'information et des services pour conserver le flux sémantique. Le niveau organisationnel

concerne les processus, les utilisateurs et les personnes participant au fonctionnement du système [10].

D. Le niveau technique.

Quand on souhaite mettre en œuvre l'interopérabilité entre deux systèmes, deux solutions sont possibles : l'intégration point par point ou « l'Entreprise Application Interface » orienté interopérabilité [11].

Dans le cas de la stratégie point par point, si l'on a un schéma de n systèmes à connecter entre eux, il faudra un nombre de traducteur égal à $n(n-1)$ pour réaliser l'intégration. Il apparaît évident qu'une telle architecture n'est pas envisageable au vu du nombre de traducteurs à développer et par rapport aux coûts de maintenance nécessaires pour assurer le bon fonctionnement du système [12].

En opposition à la stratégie point par point et depuis les travaux de Wiederhold [13] la stratégie par médiateur s'est imposée. En effet, cette architecture présente l'avantage de permettre une plus grande agilité des systèmes d'informations et d'avoir un coût global de possession des interfaces plus faible. Avec une architecture basée sur un médiateur, le nombre de relations est égal au nombre de systèmes présents dans l'architecture. La différence entre une architecture point par point et une architecture médiateur est présentée sur la figure 3.

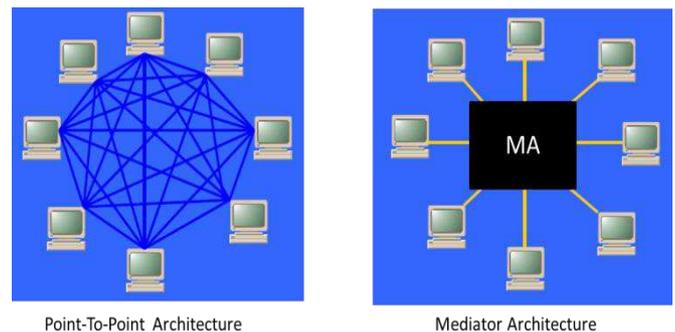


Fig. 2 : Comparaison des architectures [12]

D'après les travaux de Booth [14], une autre façon d'assurer l'interopérabilité est de se baser sur une architecture orientée service (SOA). Les Web services constituent un moyen permettant de faire interopérer différentes applications informatiques, indépendamment de la plateforme ou de l'environnement dans lequel ils sont exécutés.

Ainsi en combinant médiateur et SOA, on obtient le modèle développé par Paviot [10] comme illustré sur la figure 4 avec un médiateur d'informations orienté services. Un tel médiateur doit remplir trois fonctions de bases définies par Bénaben [15] :

- Conversion et mise à disposition des données
- Gestion des applications
- Orchestration des processus collaboratifs

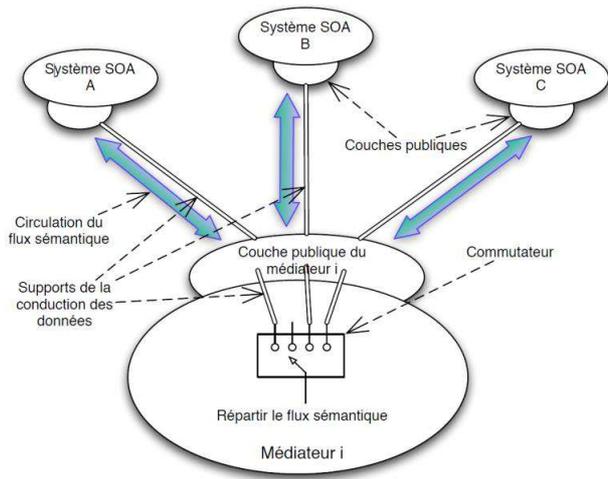


Fig. 3 : Fonction de répartition d'un médiateur de la médiation multi-échelle [10]

Cependant ce système reposant sur le médiateur peut présenter certains inconvénients développés par Zimmerman [16]. En effet il pointe l'unicité du médiateur qui peut entraîner une panne de tout le système. De plus, si le flux sémantique s'avère trop important, le médiateur pourrait constituer un goulet d'étranglement et ainsi limiter le flux sémantique.

E. Le niveau sémantique

Il existe différentes approches pour atteindre l'interopérabilité sémantique. D'après la norme [17], on retrouve trois façons d'aborder l'interopérabilité :

- L'intégration
- L'unification
- La fédération

L'intégration repose sur l'existence d'un format commun pour tous l'intégralité des systèmes. L'unification quant à elle se base sur un format commun n'existant qu'à haut niveau. Enfin, la fédération repose sur l'utilisation d'ontologies et de standards web sémantique pour l'automatisation du transfert et du routage de l'information entre des applications hétérogènes.

Beaucoup d'ouvrages utilisent l'approche par unification [10], [18] qui a l'avantage de présenter des aspects plus flexibles et plus dynamiques que l'approche par intégration comme vu dans la section (II.B). Il faut être en mesure de traduire les données d'un système à un autre pour qu'il y ait la possibilité d'un échange d'informations. Pour pouvoir réaliser une interopérabilité par l'approche unificatrice, il est possible d'utiliser des standards tels que la norme STEP [19]. La norme STEP est un standard normalisé et ouvert qui a pour but de favoriser les échanges de données dans un format qui est commun et compréhensible par tous. La norme STEP propose un format neutre, pérenne et évolutif d'échange de données, qui balaie un large éventail de domaines d'application et vise à uniformiser et simplifier les échanges. Depuis quelques années STEP-NC, un format standard de données enrichies a été développé pour permettre une meilleure interopérabilité entre les systèmes en intégrant l'aspect commande numérique à STEP [20]. L'intégration des

données d'usinage à ce format favorise donc l'interopérabilité de la chaîne numérique d'industrialisation.

De plus, selon le NIST [21] la norme STEP peut potentiellement faire économiser jusqu'à un milliard de dollars par an en réduisant les coûts de l'interopérabilité dans des secteurs comme l'automobile, l'aérospatial et l'industrie navale. Le standard STEP se positionne comme une alternative sérieuse pour une interopérabilité orientée produit [22]. Le concept d'interopérabilité orientée produit a été introduit par Baïna et décrit la capacité pour une entreprise à gérer, échanger et partager des informations produit dans un souci de transparence pour l'utilisateur [23]. Cependant, l'unification présente des défauts puisque l'utilisation d'un modèle unique nécessite de s'approprier totalement les modèles d'informations de chaque système.

Comme cité précédemment dans ce paragraphe, la fédération repose sur les ontologies ou sur des web-service. Une ontologie permet de définir des termes tels que des noms de relations, des fonctions ou des individus qui sont interprétables à la fois par les humains et par les machines [24]. Plus largement, une ontologie est l'ensemble structuré des termes et concepts représentant le sens d'un champ d'informations, que ce soit par les métadonnées d'un espace de noms, ou les éléments d'un domaine de connaissances.

Selon Noy [25], les ontologies sont définies par des éléments qui lui sont propres : les individus, les classes, les attributs, les événements.

Outre les ontologies, la fédération se base aussi sur les standards web sémantique qui ont pour but de fournir un complément nécessaire pour la compréhension des informations, simplifiant ainsi considérablement la programmation et la maintenance des connaissances reposant sur les web services [26]. Comme en témoigne la figure 2 qui décrit les différentes couches de l'architecture des standards web sémantique, les ontologies permettent la conservation du flux sémantique.

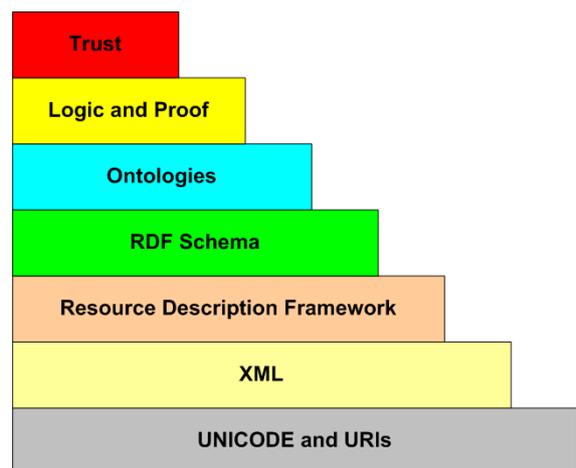


Fig. 4 : Architecture web sémantique [27]

D'après Mellor [28] et l'OMG qui développe l'ingénierie dirigée par les modèles (IDM ou MDE pour Model-Driven Engineering en anglais), l'ontologie est aussi une solution pour la mise en œuvre des MDA (Model Driven architecture). En effet, selon Naumenko and Wegmann [29], les MDA repose sur 4 niveaux ontologiques comme l'illustre la figure 5 :

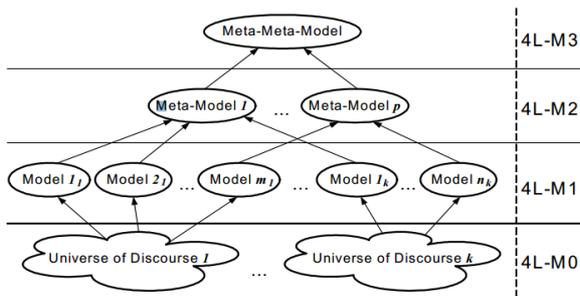


Fig. 5 : Une approche à quatre niveaux ontologiques [29].

Le MDA offre une base pour faciliter la formalisation des échanges et ainsi obtenir des solutions pour atteindre l'interopérabilité par une approche unificatrice.

Selon Kosanke [1], il apparaît évident, que l'interopérabilité ne peut pas exister dans une seule approche mais certainement comme une agrégation des trois approches pour la conservation du flux sémantique.

F. Le niveau organisationnel

Selon Vernadat [30], les aspects organisationnels de l'interopérabilité s'attachent à définir les objectifs, assurer la cohérence et coordonner les processus. Il s'agit de la capacité d'apporter la collaboration entre différentes structures et organisations qui souhaitent échanger des informations bien qu'elles puissent avoir des structures et des processus internes différents.

De plus, il s'agit de traiter les processus en plaçant les utilisateurs au centre du problème [31]. Il faut donc s'orienter sur l'aspect fonctionnel du système pour qu'il soit le plus accessible possible. Un travail sur l'interface hommes-machine-systèmes est nécessaire pour permettre l'interopérabilité organisationnelle.

Cependant, pour pouvoir réaliser l'interopérabilité au niveau organisationnel, il faut lever certaines barrières [7] :

- Définir un responsable
- Définir les autorisations
- Vérifier les incompatibilités des organisations entre elles (organisations matricielles, organisations hiérarchiques...)

En effet, une fois ces éléments traités, il est possible de définir les processus d'échange d'informations et l'utilisation de ces informations.

Dans cette section, l'interopérabilité s'installe sur trois niveaux pour assurer l'échange de données, l'utilisation de ces données et l'utilisation des fonctions des systèmes pairs. L'interopérabilité de la phase d'industrialisation qui nous intéresse ici devra donc s'établir sur les trois différents niveaux d'interopérabilité.

III. INTEROPERABILITE POUR L'INDUSTRIALISATION

Cette partie a pour but d'étudier la littérature concernant les liens entre les différentes phases de conception/industrialisation. Nous regardons ces liens sous l'angle « interopérabilité » pour déterminer les niveaux d'interopérabilité traités et les méthodes utilisées.

La chaîne numérique de conception/industrialisation contient différents logiciels expert (CAO, calcul, FAO...) et différents systèmes d'information support à ces expertises (PDM (Product Data Management), MPM (Manufacturing Process Management), ERP (Enterprise Resource Planning), MES (Manufacturing Execution System)). Dans la chaîne d'industrialisation trois types de liens sont identifiés:

- Le lien Conception / Simulation recouvrant les liens entre logiciels CAO, calcul et PDM
- Le lien Conception / Fabrication recouvrant les liens entre CAO, FAO, PDM, MPM, ERP et MES
- Le lien Conception / Assemblage recouvrant les mêmes liens logiciels et systèmes d'information que précédemment mais en prenant en compte une expertise différentes (assemblage et non fabrication)

A. Le lien Conception / Simulation

Le lien Conception / Simulation est nécessaire pour les concepteurs qui réalisent des choix technologiques pour leurs conceptions en s'orientant grâce aux informations provenant de la simulation. De nombreux travaux ont été menés pour assurer l'interopérabilité entre la conception et la simulation.

Citons par exemple Nguyen Van [32] qui définit une architecture pour assurer les boucles de collaborations entre conception et simulation. Il s'appuie sur des formats standards pour le partage d'informations entre les phases de conception et de calcul. Via cette architecture il assure la conservation du lien sémantique. Pour conserver ce lien, Assouroko [33] définit un modèle qui s'appuie sur des ontologies pour assurer l'interopérabilité entre la conception et le calcul. Pour relier chacune des ontologies, il se base sur le principe de gestionnaire de relations (GDR ou en anglais RSM). Li [34] définit une ontologie pour enrichir avec des annotations les échanges de données. Selon Barbau [35], OntoSTEP permet une représentation OWL des données en format Express ce qui permet la création d'un modèle produit avec des données enrichies. Troussier [36] s'appuie sur « les dépendances qui existent entre les informations contenues dans les notes de calcul » pour assurer l'interopérabilité entre la phase de conception et la phase de calcul. Selon Jun [37] le retour d'information des phases aval permet de suivre et de gérer l'information tout au long du cycle de vie. Biahmou [38] a développé un traducteur appelé (CATIA-MATLAB Translator) qui permet d'assurer l'interopérabilité entre conception et simulation. Tan [39] au travers du "Product Service System" place la simulation au cœur de la phase de design.

B. Le lien Conception / Fabrication

Le lien Conception / Fabrication par la capitalisation des connaissances au pied de la machine-outil permet une conception optimisée pour la fabrication.

Harik développe un outil dans le cadre du projet Usiquick qui permet d'enrichir le modèle CAO pour la génération des gammes d'usinage et des trajectoires outils [40]. Delplace [41] développe une cellule automatisée pour favoriser une intégration complète du processus de fonderie. Martin [42] développe dans ces travaux un outil s'appuyant sur le langage Visual Basic pour développer un « médiateur » pour l'ensemble des API nécessaires pour assurer le lien entre conception et fabrication d'éléments en fonderie. Il traite ainsi

le niveau technique de l'interopérabilité. De la même façon, Paviot [10], par la notion de médiateur faisant le lien entre les ontologies, traite le niveau technique. Cependant au-delà de traiter le niveau technique, en s'appuyant sur un modèle à base de « tags sémantiques », il développe le niveau sémantique de l'interopérabilité. Le Duigou [43] traite l'interopérabilité entre Conception et Fabrication en définissant un modèle générique de données basés sur différents modèles. Il utilise d'abord une approche unificatrice puis utilise l'intégration pour compléter son modèle de données assurant ainsi le flux sémantique. Kuo [44] a développé un modèle basé sur l'intelligence artificielle. Le système intelligent DFX aide le concepteur à faire des choix technologiques en s'appuyant sur une base de connaissances déjà établie. Comme vu dans le paragraphe précédent, le retour d'information « closed-loop » au long du cycle de vie permet l'interopérabilité entre la conception et la fabrication. Enfin, Tan [38] traite l'interopérabilité organisationnelle entre la conception et la fabrication.

C. Le lien Conception /Assemblage

Le lien entre Conception et Assemblage permet essentiellement d'aider le concepteur dans sa démarche de choix techniques.

Demoly [45] définit un modèle Multi-Vues Orienté Assemblage (MUVOA) qui vise à assurer le lien entre conception et assemblage. Le flux sémantique est ainsi assuré au travers de l'implication des acteurs métiers traitant aussi les problèmes d'organisation. Mantripragada [41] a développé un outil appelé « Assembly Oriented Design (AOD) » qui décompose chaque assemblage en sous-assemblages de façon à informer le designer des différentes étapes à réaliser pour monter le système. [40] assure l'interopérabilité technique pour lien conception /assemblage.

D. Synthèse

Afin d'analyser cette synthèse bibliographique, les trois niveaux d'interopérabilité vus précédemment sont utilisés :

- Niveau Sémantique
- Niveau Technique
- Niveau Organisationnel

A partir de ces éléments, l'analyse bibliographique peut être synthétisée dans un tableau à double-entrée permettant de classer les différents travaux dans la catégorie qui lui correspond. Les résultats de cette analyse sont présentés dans le Tableau 1.

	Niveau Technique	Niveau Sémantique	Niveau Organisationnel
Lien Conception / Calcul	[36] [37] [38]	[32] [33] [34] [35] [46]	[39]
Lien Conception / Fabrication	[10] [37] [40] [41] [42] [44]	[10] [43]	[39]
Lien Conception / Assemblage	[37] [44] [47]	[43] [45]	[39] [45]

TABLE 1

SYNTHESE DE L'ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

La littérature traite abondamment les barrières liées aux niveaux sémantiques et techniques. En revanche les barrières liées au niveau organisationnel sont moins traitées par la littérature puisqu'associées à des problèmes de nature humaine [48].

Concernant le niveau technique, les recherches actuelles utilisent principalement les SOA et les systèmes de médiateurs. Sur le niveau sémantique, ce sont les ontologies et l'approche fédérée qui sont les plus exploitées.

IV. PERSPECTIVES ET CONCLUSION

Comme Xu [49] l'explique dans ces travaux, le STEP-NC permet de porter, au travers de son format riche de données, de nombreuses informations qui permettent d'intégrer la chaîne numérique CAO-FAO-CN. Ce format standard permet donc de compiler l'ensemble des informations provenant de la conception, de la simulation et de la fabrication. Le format STEP-NC assure la bidirectionnalité de la chaîne numérique entre la conception et la fabrication puisqu'il permet un retour d'information depuis les phases de fabrication et de simulation vers la phase de conception.

Au vu de l'état des travaux déjà réalisés qui traitent l'interopérabilité dans les phases de conception et de simulation [50], il apparaît que l'interopérabilité entre PDM/MPM/ERP/MES a très peu été traitée. En effet, le MPM apparaît comme un élément essentiel pour la gestion des cycles de vie des gammes de fabrication. Selon [51], le MPM est l'unique logiciel en mesure de fournir un lien entre les phases amonts tels que la CAO et le PDM, et les applications aval, tels que l'ERP et le MES.

Ce papier dresse l'état de l'art des différents niveaux d'interopérabilité. Les trois niveaux (sémantique, technique et organisationnel) présentent des barrières et nous avons vu que différentes approches existent pour lever ces barrières à l'interopérabilité.

Une combinaison du format STEP-NC pour la chaîne CAO-FAO-CN et se servir du modèle STEP-NC comme base pour une ontologie support au modèle du MPM semble une voie possible pour améliorer l'interopérabilité de la chaîne numérique de conception/industrialisation. Cet axe sera étudié dans nos futurs travaux.

REMERCIEMENTS

Ces travaux sont réalisés dans le cadre du projet FUI ANGEL. Nous remercions également l'ensemble des partenaires du consortium pour leurs apports durant le développement des idées et des concepts proposés dans ce papier.

RÉFÉRENCES

- [1] K. Kosanke, "ISO Standards for Interoperability: a comparison," in *Proceedings of the 1st International Conference on Interoperability of Enterprise Software and Applications*, 2005, pp. 55–64.
- [2] IEEE, "IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers): Standard Computer Dictionary- A Compilation of IEEE Standard Computer Glossaries." 1990.
- [3] ATHENA, "Document Deliverable D.A1.1.1, Project A1: Enterprise Modelling in the Context of Collaborative Enterprises ATHENA, EU IP- Project - No 507849," 2004.
- [4] INTEROP, "Knowledge map of research in interoperability in the INTEROP NoE, Deliverable D1.1, EU-NoE Project IST-508 011, www.interop.no.e.org," 2004.
- [5] F. Vernadat, "Enterprise Modelling and Integration: principles and applications," *Chapman & Hall, ISBN 0 412 60550 3*, 1996.

- [6] P. Wegner, "Interoperability," *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 28, no. 1, pp. 285–287, 1996.
- [7] D. Chen, G. Doumeingts, and F. Vernadat, "Architectures for enterprise integration and interoperability: Past, present and future," *Computers in Industry*, vol. 59, no. 7, pp. 647–659, Sep. 2008.
- [8] D. Chen and G. Doumeingts, "European initiatives to develop interoperability of enterprise applications—basic concepts, framework and roadmap," *Annual Reviews in Control*, vol. 27, no. 2, pp. 153–162, Jan. 2003.
- [9] EIF, "European Interoperability Framework," *White Pages*. pp. 1–40, 2004.
- [10] T. Paviot, "Méthodologie de résolution des problèmes d'interopérabilité dans le domaine du Product Lifecycle Management," Thèse de doctorat de l'École Centrale Paris, 2010.
- [11] T. Paviot, V. Cheutet, and S. Lamouri, "Design and logistics IT federation through Product Lifecycle Support standard," in *PLM09*, 6-8 July 2009, Bath, UK.
- [12] E. Guyot, G. Ducellier, B. Eynard, P. Girard, and T. Gallet, "Product data and digital mock-up exchange based on PLM," in *Proceedings of PLM07*, 11-13 July 2007, Milano, Italy.
- [13] G. Wiederhold, "Mediators in the Architecture of Future Information Systems Gio Wiederhold," *The IEEE Computer Magazine*, vol. 25, no. 3, pp. 1–38, 1992.
- [14] D. Booth, H. Haas, F. McCabe, E. Newcomer, M. Champion, C. Ferris, and D. Orhcard, "Web Services Architecture. W3C Working Group," *W3C Working Group Note*, 2004.
- [15] F. Bénaben, J. Touzi, V. Rajsiri, and H. Pingaud, "Collaborative Information System Design," in *AIM Conferences*, 8-9 June 2006, Luxembourg.
- [16] A. Zimmermann, M. Krötzsch, J. Euzenat, and P. Hitzler, "Formalizing Ontology Alignment and its Operations with Category Theory," in *Proceedings of FOIS 2006*, 9-11 Novembre 2006, Baltimore, Maryland, USA.
- [17] ISO 14258, "Industrial Automation Systems- Concepts and Rules for Enterprise Models," *ISO TC184/SC5/WG1*, 1994.
- [18] A. Tursi, H. Panetto, G. Morel, and M. Dassisti, "Ontological approach for products-centric information system interoperability in networked manufacturing enterprises," *Annual Reviews in Control*, vol. 33, no. 2, pp. 238–245, Dec. 2009.
- [19] S.-H. Lee and Y.-S. Jeong, "A system integration framework through development of ISO 10303-based product model for steel bridges," *Automation in Construction*, vol. 15, no. 2, pp. 212–228, Mar. 2006.
- [20] I. Assouroko, P. Boutinaud, B. Eynard, and G. Ducellier, "Survey on standards for product data exchange and sharing : application in CAD / CAE interoperability," *International Journal of Design and Innovation Research*, vol. 5, no. 1, pp. 9–15, 2010.
- [21] M. P. Gallaher, A. O'Connor, and T. Phelps, "Economic Impact Assessment of the International Standard for the Exchange of Product Model Data (STEP) in Transportation Equipment Industries," NIST Report, 2002.
- [22] S. Rachuri, E. Subrahmanian, A. Bouras, S. J. Fenves, S. Fofou, and R. D. Sriram, "Information sharing and exchange in the context of product lifecycle management: Role of standards," *Computer-Aided Design*, vol. 40, no. 7, pp. 789–800, Jul. 2008.
- [23] S. Baïna, H. Panetto, and G. Morel, "Holon-oriented b2m process modelling approach for applications interoperability in manufacturing systems environment," in *Proceedings of the IFAC World Congress*, 4-8 July, 2005, Prague, Czech Republic.
- [24] T. R. Gruber, "Ontolingua : A Mechanism to Support Portable Ontologies," *KSL 91-66*, vol. 581, no. 1, pp. 1–61, 1992.
- [25] N. Noy and M. Klein, "Ontology Evolution: Not the Same as Schema Evolution," *Knowledge and Information Systems*, vol. 6, no. 4, pp. 428–440, Mar. 2004.
- [26] V. R. Benjamins, J. Contreras, O. Corcho, and A. Gómez-Pérez, "Six Challenges for the Semantic Web," *Challenges*, vol. 1, no. 1, pp. 1–15, 2001.
- [27] B. Matthews, D. Brickley, and L. Dodds, "Semantic Web Technologies," *JISC Technology and Standards Watch*, 2005.
- [28] S. J. Mellor, S. Kendall, A. Uhl, and D. Weise, "Model driven architecture," in *OMG white paper*, 2000, pp. 290–297.
- [29] A. Naumenko and A. Wegmann, "Two Approaches in System Modelling and Their Illustrations with MDA and RM-ODP," in *ICEIS 2003, the 5th International Conference on Enterprise Information Systems*, 2003, pp. 398–402.
- [30] F. Vernadat, "Technical, semantic and organizational issues of enterprise interoperability and networking," *Annual Reviews in Control*, vol. 34, no. 1, pp. 139–144, Apr. 2010.
- [31] EIF, "European Interoperability Framework for pan-European eGovernment Services," in *Interoperable Delivery of European eGovernment Services to public Administrations*, 2004.
- [32] T. Nguyen Van, "System engineering for collaborating data management systems : Application to design/simulation loop," PhD thesis from Ecole Centrale Paris, 2006.
- [33] I. Assouroko, G. Ducellier, B. Eynard, P. Boutinaud, D. Stalingrad, and P. Technologique, "Semantic-based approach for the integration of product design and numerical simulation," in *PLM11*, 2011.
- [34] C. Li, C. Memahon, L. Newnes, and Y. Liu, "Ontology-Based Annotation in PLM Systems," in *International Conference on Product Lifecycle Management*, 12-14 July 2010, Bremen, Germany.
- [35] R. Barbau, S. Krima, S. Rachuri, A. Narayanan, X. Fiorentini, S. Fofou, and R. D. Sriram, "OntoSTEP: Enriching product model data using ontologies," *Computer-Aided Design*, vol. 44, no. 6, pp. 575–590, Jun. 2012.
- [36] N. Troussier, "A Way to Identify and Manage the Knowledge Provided by Mechanical Simulations in Engineering Design," *Computing and Information Systems*, vol. 7, no. 3, pp. 79–84, 2000.
- [37] H.-B. Jun, D. Kiritsis, and P. Xirouchakis, "Research issues on closed-loop PLM," *Computers in Industry*, vol. 58, no. 8–9, pp. 855–868, Dec. 2007.
- [38] A. Biahmou, A. Fröhlich, and J. Stjepandic, "Improving Interoperability in Mechatronic Product Development," in *International Conference on Product Lifecycle Management*, 12-14 July 2010, Bremen, Germany.
- [39] A. R. Tan, D. Matzen, T. C. McAloone, and S. Evans, "Strategies for designing and developing services for manufacturing firms," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 90–97, Jan. 2010.
- [40] R. Harik, V. Capponi, M. Lombard, and G. Ris, "Enhanced functions supporting process planning for aircraft structural parts," in *Computational Engineering in Systems Applications*, Beijing, China, October 4-6, 2006.
- [41] A. Bernard, J.-C. Delplace, N. Perry, and S. Gabriel, "Integration of CAD and rapid manufacturing for sand casting optimisation," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 9, no. 5, pp. 327–333, 2003.
- [42] L. Martin, G. Moraru, and P. Véron, "Development of an integrated tool for the foundry industry," in *6th International Conference on Engineering, Design and Manufacturing in Mechanical (IDMME)*, Grenoble, France, May 17-19, 2006.
- [43] J. Le Duigou, A. Bernard, and N. Perry, "Framework for Product Lifecycle Management integration in Small and Medium Enterprises networks," vol. 8, 2012.
- [44] T. Kuo, S. Huang, and H. Zhang, "Design for manufacture and design for 'X': concepts, applications, and perspectives," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 41, no. 3, pp. 241–260, 2001.
- [45] F. Demoly, L. Toussaint, B. Eynard, D. Kiritsis, and S. Gomes, "Geometric skeleton computation enabling concurrent product engineering and assembly sequence planning," *Computer-Aided Design*, vol. 43, no. 12, pp. 1654–1673, Dec. 2011.
- [46] M. J. Pratt, "ISO 10303: the STEP Standard for Product data Exchange and its capabilities," *International Journal Product Lifecycle Management*, vol. 1, no. 1, pp. 86–94, 2005.
- [47] R. Mantripragada, "Assembly oriented design: concepts algorithms and computational tools," Thesis (Ph. D.)--Massachusetts Institute of Technology, 1998.
- [48] D. Chen, "Enterprise interoperability framework," in *Proceedings of Enterprise Modelling and Ontologies for Interoperability*, 5-6 June 2006, Luxembourg.
- [49] X. W. Xu, H. Wang, J. Mao, S. T. Newman, T. R. Kramer, F. M. Proctor, and J. L. Michaloski, "STEP-compliant NC research: the search for intelligent CAD/CAPP/CAM/CNC integration," *International Journal of Production Research*, vol. 43, no. 17, pp. 3703–3743, Sep. 2005.
- [50] T. Paviot, "MultiCAD / MultiPDM integration framework," *PLM08*, 9-11 July 2008, Seoul, Korea.
- [51] D. Elheni-daldoul, J. Le Duigou, and B. Eynard, "Enterprise information systems ' interoperability : Focus on PLM challenges," *Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011*, p. 7, 2011.